第46卷 第9期
2023年9月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 9
Sep. 2023

陕西省汛期极端降水概率分布及综合危险性评估

史维良， 车璐阳， 李 涛

（西安财经大学统计学院，陕西 西安 710100）

摘 要： 极端降水导致的暴雨洪涝灾害是陕西省第二大自然灾害，对社会稳定及经济发展造成了严重的影响。为明确极端降水风险，利用陕西省1969—2020年汛期（5—10月）的日降水数据构建极端降水量、极端降水频次、极端降水强度序列，选取6种极值概率分布模型对构建的序列进行拟合得到陕西省汛期极端降水最优概率分布模型；计算极端降水量以判断未来陕西省极端降水事件变化趋势；基于不同情景得到综合危险性空间分布，对陕西省极端降水综合危险性进行评估。结果表明：（1）Wakeby概率分布为最优概率模型，在3个极端降水指标序列中占比最多，且经过误差分析对比得到Wakeby分布函数是拟合陕西省汛期极端降水指标序列的最优概率分布模型。（2）计算不同重现期下的极端降水量与现有降水最大值进行对比，发现陕西省大多数地区发生小概率、高危险性的极端降水事件可能性增大。（3）陕西省汛期极端降水综合危险性整体从陕南至陕北呈南高北低分布，2 a、5 a、10 a、20 a、50 a、100 a一遇情景下危险区域各不相同。随着重现期的增加，低危险区逐渐消失，高危险区面积逐渐增大，100 a重现期下，高危险区面积占比从0增长至22.0%。研究结果可为陕西省极端降水概率分布研究提供参考，为汛期极端降水风险管理和评估工作提供理论依据。

关 键 词： 极端降水；概率分布；危险性分析；风险评估；陕西省

文章编号： 1000－6060（2023）09－1407－11（1407～1417）

全球变暖导致洪灾、旱灾等自然灾害频繁发生，对人类社会稳定和经济发展影响严重，防灾减灾工作刻不容缓。评估自然灾害风险是进行防灾减灾工作的重要基础，其中对于致灾因子危险性的分析是关键[1]。暴雨灾害作为中国最主要的气象灾害之一，每年因其造成的生命财产损失十分严重。2021年暴雨致灾人数达5901×10^{4}人，失踪死亡人数590人，直接经济损失2458.9×10^{8}元，其中河南、山西、陕西等省份灾情较往年来比偏重[2]。陕西省气候变化复杂，降水分布不均且汛期容易发生暴雨洪涝灾害，目前对陕西省汛期极端降水的概率分布模型研究甚少，缺乏省域内极端降水灾害的综合评价。因此，开展陕西省汛期极端降水危险性综合评估工作，对于陕西省防灾减灾和风险管理工作来说意义重大。

对于暴雨灾害的危险性评估首先是要确定危险性指标的概率分布。传统的水文统计中常用的概率分布是皮尔逊Ⅲ型曲线。近年来，许多学者利用广义极值分布、Gamma分布[3]、Wakeby分布、广义帕累托分布[4]等概率分布函数对不同地区进行分析，由于各区域气候不同，需要根据实际数据来确定某一区域的最优概率分布。利用概率分布模型模拟极端降水指标的重现期，进一步进行危险性分析。关于极端降水的危险性分析通常是选取相关指标进行评估，如极端降水量、暴雨日数等[5]。唐瑜聪[6]通过建立评价指标体系对深圳市极端气候灾害

收稿日期： 2022-11-02； **修订日期：** 2023-01-06

基金项目： 国家社会科学基金青年项目（20CTJ008）；陕西省社会科学基金项目（2020F003）；西安财经大学研究生创新基金项目（21YC031）资助

作者简介： 史维良（1973-），女，硕士，副教授，主要从事应用统计与风险管理等方面的研究. E-mail: 1605645131@qq.com

通讯作者： 车璐阳（1997-），女，硕士研究生，主要从事应用统计与自然灾害风险管理等方面的研究. E-mail: m15091393266@163.com

风险进行评估，其中危险性指标选取了最长连续降水量、连续5 d最大降水量。周静静等[7]通过选择合适的危险性指标对陕西省秦巴山区的地质灾害危险性做出评价。王鹏等[8]提出计算危险性概率的方法，并绘制出汉江流域洪涝灾害危险性区划图。迟潇潇[9]对中国极端降水进行时空分析，基于不同情景选择极端降水量和极端降水频次分析中国极端降水综合危险性。

准确评估陕西省汛期极端降水危险性，是进行暴雨防灾减灾工作的重要基础。本文选取陕西省1969—2020年汛期（5—10月）日极端降水数据，对陕西省极端降水指标进行概率分布拟合，选取最优概率分布模型，利用概率分布模型计算极端降水指标的重现期，在此基础上对陕西省汛期极端降水综合危险性进行评估。

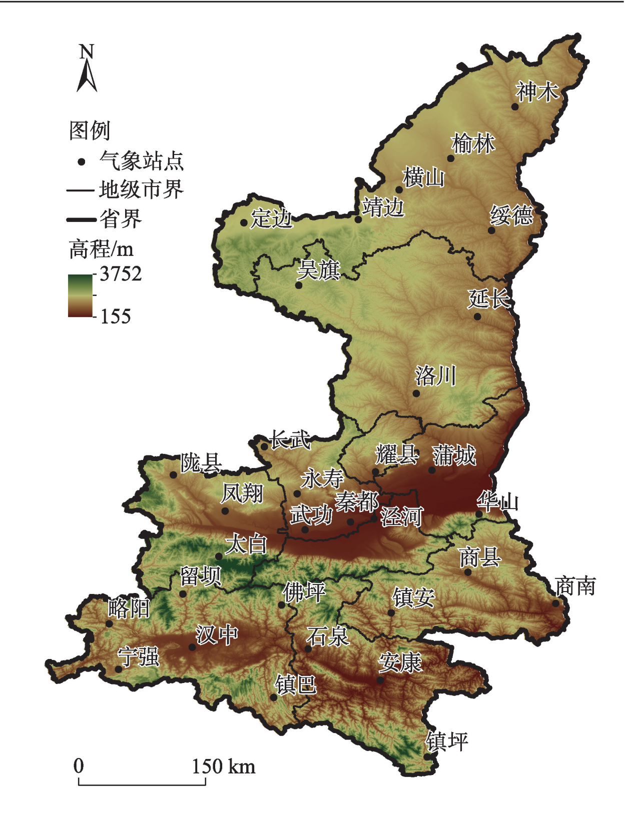
1 资料与方法

1.1 研究区概况

陕西省（105°29′~111°15′E，31°42′~39°35′N），位于中国内陆腹地，总面积20.56 km²，全省年平均气温9~16 ℃，年平均降水340~1240 mm。陕南、陕北和关中地区降水不平均，汛期由于极端降水造成洪涝灾害事件发生频繁，全省每年因自然灾害造成的直接经济损失可达90多亿元[10]。近几年降水趋势明显增大，2021年8月30日，陕西省安康市10县区遭暴雨袭击造成68640人受灾，农作物受灾面积1780 hm²，直接经济损失3.41×10⁸元[11]。

1.2 数据来源

本文所用数据主要包括气象数据和地理信息数据等。气象数据来自国家气象中心提供的陕西省32个基准气象站点（图1）的1969—2020年汛期（5—10月）逐日降水数据，日降水数据记录时间为前一天20:00—当天20:00（共24 h）。地理信息数据来源于全国1:250000数字高程模型（30 m精度），在ArcGIS中以陕西省的基础地理矢量数据为掩膜裁剪得到陕西省高程数据。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作，地图边界无修改。下同。

图1 研究区气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the study area

1.3 研究方法

1.3.1 极端降水指标序列 极值理论十分关注极值序列的构建，常用的选样方法有年最大值法（Annual maximum，AM）和超门限峰法（Peak over threshold，POT）[12]。POT序列是确定某一阈值，由超过阈值的数据组成序列[13]。AM序列是时间序列，由每年的日降水量、降水频次、降水强度最大值组成，其优点是能够较好地表征极端降水指标在时间上的变化。有研究表明AM序列更适合描述陕西省的极端降水特征[14]，因此本文选取AM法构建极端指标序列，并构建了3个AM序列，分别是由陕西省1969—2020年每一年汛期的最大日降水量、最多降水频次、最高降水强度相关数据组成的序列。

1.3.2 概率分布模型 概率分布的数学模式是对降水统计特征最完全的描述。正确的估计和计算不同雨量对应的概率是为了完整的认识该地区极端降水的总体特征。极值理论的概率分布研究中常用的几种分布为Gen.Extreme Value（GEV）、Gen.Pareto（GP）、P-Ⅲ型、Gen.Logistic、Lognormal等。根据已有研究结果[14-17]，本文选取了6种极端降水研究常用的概率分布来拟合陕西省汛期极端降水量、极端降水频次、极端降水强度的AM序列，具体概率分布见表1。由于Wakeby分布没有具体形式，本文

表1　不同概率分布模型累积分布函数表达形式

Tab. 1　Expression of cumulative distribution function of different probability distribution models

分布模型	累积分布函数	参数说明
Gen.Extreme Value（GEV）	$F(x)=\begin{cases}\exp\left[-(1+kz)\right]^{-1/k} & k\neq 0\\ \exp(-e^{-z}), & k=0\end{cases}, z=\frac{x-\mu}{\sigma}$	μ 、σ 、k 分别为尺度参数、位置参数、形状参数
Gen.Pareto（GP）	$F(x)=1-\left[1-k\frac{x-\beta}{\alpha}\right]^{\frac{1}{k}}, k\neq 0, \beta\leqslant x\leqslant\frac{\alpha}{x}$	α 、k 分别为尺度参数、形状参数；β 为门限值
P-Ⅲ型	$F(x)=\frac{\tau_{x/\beta}(\alpha)}{\tau(\alpha)}$	α、β 分别为形状参数、尺度参数
Gen.Logistic	$F(x)=\frac{1}{\left[1+\exp(-x)\right]^{c+1}}$	c 为形状参数
Lognormal	$F(x)=\phi\left[\frac{\ln(x-\gamma)-\mu}{\sigma}\right]$	μ 为对数均值、σ 为对数标准差、γ 为位置参数

参考Houghton[18]给出的公式，计算公式如下：

$$x=\xi+\frac{\alpha}{\beta}\left[1-(1-F)^{\beta}\right]-\frac{\gamma}{\delta}\left[1-(1-F)^{-\delta}\right] \tag{1}$$

式中：α 、γ 为尺度参数；β、δ 为形状参数；ξ 为位置参数。

1.3.3　Kolmogorov-Smirnov 优度检验　Kolmogorov-Smirnov检验法可以用来检验样本数据是否服从某一个特定分布[19]。其假设为，

H_0:样本所来自的总体分布服从某个特定分布；

H_1:样本所来自的总体分布不服从某个特定分布。

K-S统计量的计算公式为：

$$D=\mathrm{Max}\left|F_n\left(x_{(i)}\right)-F_0\left(x_{(i)}\right)\right|, 1\leqslant i\leqslant n \tag{2}$$

式中：$F_0\left(x_{(i)}\right)$ 为经验分布；$F_n\left(x_{(i)}\right)$ 为目标分布的累积分布函数；D为实际观测值，当D小于检验临界值时，则认为2个分布拟合结果较好，此外D值越小，拟合效果越好。本文极端降水量、极端降水频数和极端降水强度样本量为52。当n=52，显著水平$\alpha=0.05$，K-S检验临界值为0.1886。

1.3.4　重现期与情景模拟　“重现期”带有统计平均的意义，是指概率意义上的回转周期。比如常说的百年一遇指的是以年为统计单位至少有1%的发生概率。其目的是预测陕西省各地区是否容易发生极端降水事件，为有关部门进行自然灾害风险评估、城市雨洪风险管理提供支撑。本文使用最优概率分布函数对不同重现期下研究区极端降水量进行拟合，再将现有最大极端降水值与不同重现期下的极端降水量进行比较，进一步验证结果的准确度。

重现期是指未来可能发生的暴雨强度值大于或等于现在值的平均间隔时间。重现期与频率成反比，计算公式如下：

$$P=1/P_n \tag{3}$$

式中：P为重现期；P_n 为该重现期下对应频率；n为重现期下对应的时间。如P=2时，P_2表示2 a一遇重现期下对应的频率。

重现期有统计平均的意义，不能简单将它看作多少年一定出现一次，只有在大量的过程中是正确的。选取不同重现期下的极端降水量、极端降水频数、极端降水强度对陕西省极端降水危险性进行分析。本文选取的重现期为2 a、5 a、10 a、20 a、50 a和100 a。

2　结果与分析

2.1　最优概率分布模型

2.1.1　极端降水指标最优概率分布模型初步确定　最优概率分布模型的确定有助于了解研究区的概况及准确推断极端降水重现期的指标值，为进一步研究综合危险性打下坚实基础。对于概率分布的拟合可分为4个步骤：(1) 极端降水指标序列的构建；(2) 选择分布函数；(3) 参数估计；(4) 对结果进行统计检验。

选取年最大值法构建陕西省极端降水量、极端降水频次和极端降水强度3个指标的极值序列，每个指标各有32个序列，选择Wakeby、GEV、GP、P-Ⅲ型、Gen.Logistic和Lognormal共6个分布模型对其进行参数估计，利用K-S拟合优度法[19]对结果进行统计检验。给定显著性水平0.05，查表可得临界值$D_{52}(0.05)$=0.1886，计算出的临界值小于0.1886时，则

认为此函数能拟合该序列。根据各指标32个序列的检验结果，计算每个指标各概率分布函数的通过率（表2）。可得Wakeby、GEV、GP、P-Ⅲ这4个分布模型的通过率均为100%，都可以用来拟合3个极端降水序列。Gen.Logistic分布模型对极端降水量序列的通过率为100%，对极端降水频次和极端降水强度的通过率都为96.87%，其中极端降水频次序列中秦都站不能用Gen.Logistic分布模型拟合，极端降水强度序列中商县站不能用Gen.Logistic分布模型拟合。Lognormal分布模型对极端降水量序列的通过率为100%，极端降水频次通过率为62.50%，有12个站点不能用其拟合，分别为榆林站、神木站、定边站、靖边站、长武站、横山站、绥德站、商县站、陇县站、略阳站、秦都站、商南站；极端降水强度序列通过率为87.50%，4个站点不能用Lognormal分布模型拟合，分别为华山站、秦都站、佛坪站和商县站。

表2 各分布模型拟合极端降水序列通过率统计

Tab. 2 Statistics on the pass rate of each distribution model fitting extreme precipitation series /%

分布模型	通过率		
	极端降水量	极端降水频次	极端降水强度
Wakeby	100.00	100.00	100.00
GEV	100.00	100.00	100.00
GP	100.00	100.00	100.00
P-Ⅲ	100.00	100.00	100.00
Gen.Logistic	100.00	96.87	96.87
Lognormal	100.00	62.50	87.50

表2得到各分布模型拟合3个极端降水指标的通过率，各指标生成的32个序列对于拟合的概率分布会有最适合本序列的分布函数，统计各站点的最优分布函数出现次数，出现次数最多的分布函数则认为是研究区最优分布函数，具体统计结果见表3。由表3可知，3个极端指标序列中，Wakeby分布模型出现次数均为最多。又由表2可知Wakeby分布模型可以用来拟合3个极端降水序列，因此初步认为Wakeby分布为3个极端指标序列的最优分布模型。

2.1.2 误差分析 通过2.1.1初步得到Wakeby分布为陕西省汛期极端降水指标的最优分布模型，但并不是所有序列的最优概率分布模型都是Wakeby分布函数，因此需要进行误差分析来进一步验证模型的精度。具体做法为：选择Wakeby分布与各站点自身最优分布拟合50 a一遇情景下的极端降水指标值，将其与实际观测数据中的最大值进行比较计算误差率，误差率=(实际值-预测值)/实际值，为方便分析，本文中使用的是绝对值，具体结果见图2。

表3 极端指标序列最优函数统计结果

Tab. 3 Statistical results of optimal function of extreme index sequence

分布模型	站点个数		
	极端降水量序列	极端降水频次序列	极端降水强度序列
Wakeby	20	16	25
GEV	2	5	1
GPD	4	5	0
P-Ⅲ	1	4	0
Gen.Logistic	1	2	5
Lognormal	4	0	1

极端降水量Wakeby分布模型拟合的值与实际最大值之间的误差率最高为0.35，最低为0.009，且84.4%站点误差率没有超过0.2；最优分布与实际值之间的误差率最高为0.37，最低为0.007（图2a）。32个气象站点的Wakeby分布模型误差率都比最优分布模型的误差率要低，说明Wakeby分布模型对极端降水量序列的拟合效果较好。

极端降水频次最高的误差率为0.37（秦都站），其最优分布模型就是Wakeby分布；此外Wakeby分布模型与实际最大值之间误差率最低为0.014，最优分布模型误差率最低为0（图2b）。2种分布与实际最大值之间的误差率差别不大，且Wakeby分布模型的误差率普遍低于最优分布模型的误差率，说明Wakeby分布模型对极端降水频次序列的拟合效果较好。

极端降水强度Wakeby分布模型拟合的值与实际最大值之间的误差率最高为0.32，最低为0.001，且84.4%站点误差率没有超过0.2；最优分布模型与实际值之间的误差率最高为0.42，最低为0.008（图2c）。大多数气象站点的Wakeby分布模型误差率都比最优分布模型的误差率低，有少数几个比最优分布模型的误差率要高，但是总体差别不大，说明Wakeby分布模型对极端降水强度序列的拟合效果较好。

因此，选择Wakeby概率分布作为拟合陕西省汛期极端降水指标序列的最优分布模型。

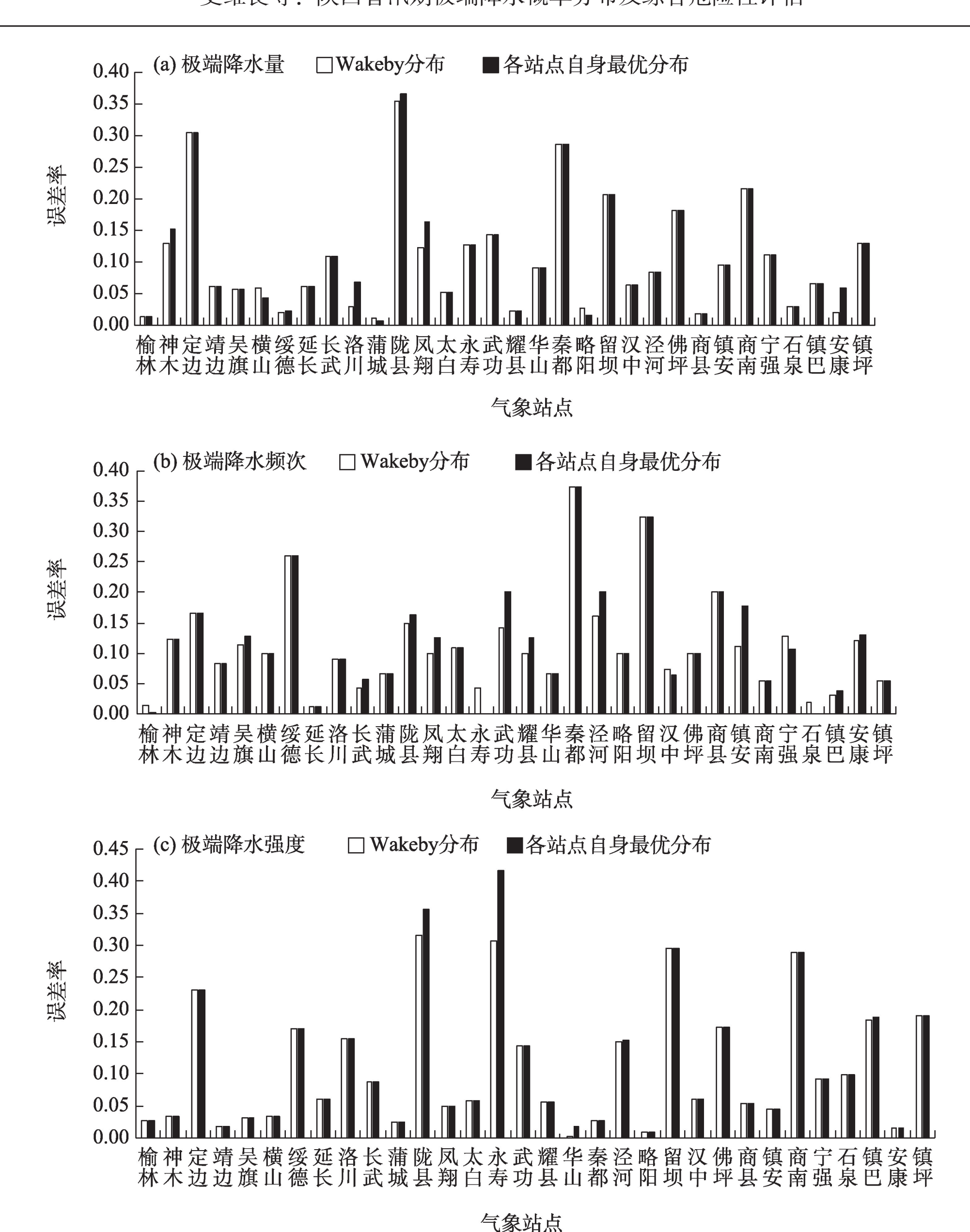


图2　极端降水指标Wakeby分布模型、最优分布模型与实际值对比误差

Fig. 2　Comparison errors between extreme precipitation indices of Wakeby distribution model, optimal distribution model and actual values

2.2　极端降水量重现期分析

研究极端降水量重现期是为了分析研究区未来发生极端降水事件可能性，为陕西省极端降水变化提供相关依据，是评估极端降水危险性的重要基础。由于极端降水频次、极端降水强度是在极端降水量的基础上得到的指标，因此本研究仅对极端降水量重现期进行分析。使用最优分布函数——Wakeby分布函数，拟合不同重现期下陕西省汛期各气象站点的极端降水量曲线，将32个站点按陕北、陕南、关中3个地区分组进行比较(图3)。

总体来说，同一重现期下陕西省降水极值呈现南多北少的局面，陕北地区总体降雨量少且强度低，极端降水事件较难发生；关中地区部分站点降雨多，其中陇县站较易发生极端事件；陕南地区降雨多、强度高，容易发生极端降水事件。具体来讲，陕北地区站点降水极值2 a一遇到100 a一遇均处在40~145 mm之间，属于一般暴雨范畴，表明陕北地区从概率上来讲较难发生雨量极大的极端降水事件；关中地区的华山、陇县、武功3个气象站点20 a一遇、50 a一遇、100 a一遇的重现期水平均超过了

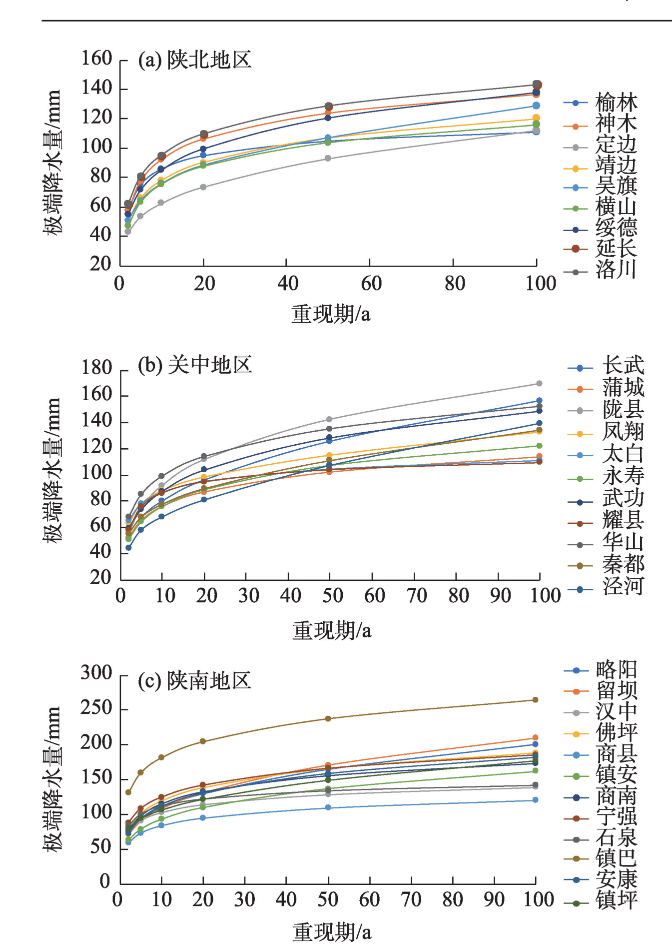


图3 陕西省气象站点重现期降水量曲线

Fig. 3 Return period precipitation curve of meteorological stations in Shaanxi Province

100 mm，为大暴雨水平；陕南地区除商县站之外，其余所有的气象站点20 a一遇、50 a一遇、100 a一遇的重现期水平均是达到了100 mm以上，总体降水较多，其中镇巴站的降水量最多，远超过其他各站点，在20 a、50 a、100 a尺度下的重现期降水量达到200 mm以上，最易发生特大暴雨。

选取各站点序列现有的日极端降水最大值，与拟合得到的50 a一遇、100 a一遇的极值进行对比(图4)。陕西省目前已有25个气象站点过去52 a的日降水最大值超过了重现期为50 a的拟合值，其中还有7个站现有最大降水量超过了重现期为100 a的极值水平，陇县站现有最大值远超100 a一遇的降水量。

因此，含有52 a日降水极值的AM序列现有最大值落入50 a一遇概率区间的可能性非常大，已经达到50 a一遇标准；超过100 a一遇的站点有7个，但是超过250 mm特大暴雨水平的站点不多，仅陕南地区的镇巴站在100 a一遇的情况下降水量超过250 mm。大多数气象站点极端降水发生的概率可能已经达到50 a一遇对应分位数的右侧分布，在一定程度上说明陕西省多数地区的汛期降水未来可能会朝着小概率、高危险的极端降水事件发展。

2.3 陕西省汛期极端降水综合危险性分析

陕西省汛期降水发生极端降水事件的可能性增大，因此本节在极端降水量的基础上，模拟不同情景叠加极端降水频次和极端降水强度2个指标对陕西省汛期极端降水进行危险区划及分析。利用Wakeby分布函数计算32个气象站点不同重现期下的极端降水指标值，然后极端降水指标各自的危险性制定划分标准，按国家标准划分降水量危险性等级[20]；根据自然断点法对极端降水频次和极端降水强度进行等级划分，具体划分标准见表4。

根据上述各指标序列危险性的等级划分，利用

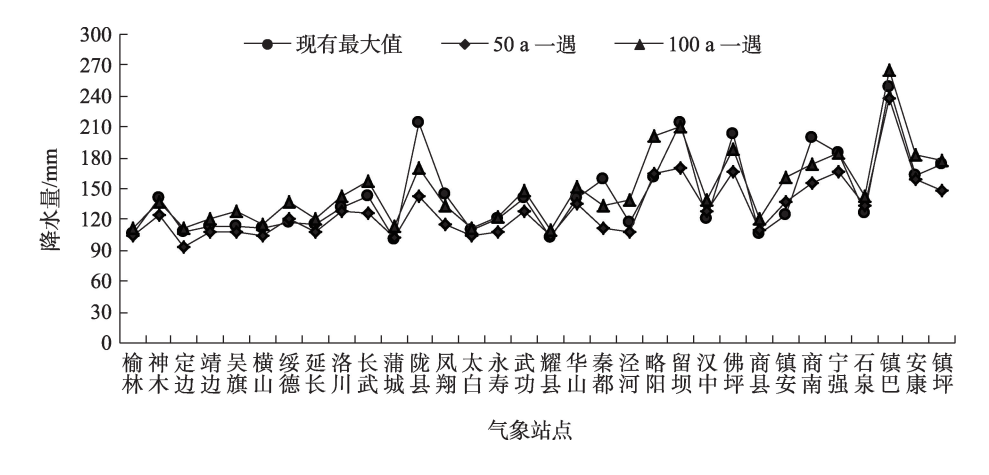


图4 现有最大降水值与50 a、100 a重现期降水量极值水平

Fig. 4 Existing maximum precipitation values and the extreme value level of the 50 a and 100 a return period

表4　极端降水危险性等级划分

Tab. 4　Risk classification of extreme precipitation

等级	极端降水量/mm	极端降水频次/次	极端降水强度/mm·d⁻¹
低	<25	<3	<50
较低	25~50	3~6	50~65
中	50~100	6~8	65~80
较高	100~250	8~10	80~95
高	>250	>10	>95

ArcGIS软件的克里金插值法对极端降水量、极端降水频次、极端降水强度指标序列进行插值，得到2 a、5 a、10 a、20 a、50 a及100 a重现期下的各指标危险性空间分布；通过栅格对3个极端降水指标的危险性空间分布进行叠加计算，得到陕西省汛期极端降水综合危险性分布图（图5）。总体来看，陕西省极端降水综合危险性分布不均，随着重现期的增加，危险区域也在不断扩大，整体表现为南高北低的趋势。

2 a一遇情景下，陕西省极端降水综合危险性只有低和较低2种。陕北和关中地区全都处于低危险区；陕南地区的商县站和镇安站处于低危险区，其余处于较低危险区。

5 a一遇情景下，相比2 a一遇情景低危险区增大，并出现了中危险区。陕北地区的神木、延长、洛川站为较低危险区，其余地区仍为低危险区；关中地区的永寿、秦都、泾河、长武、耀县、蒲城站为低危险区，其余为较低危险区；陕南地区的镇巴站和宁强站为中等危险区，其余全为较低危险区。

10 a一遇情景下，陕西省境内低危险区面积减

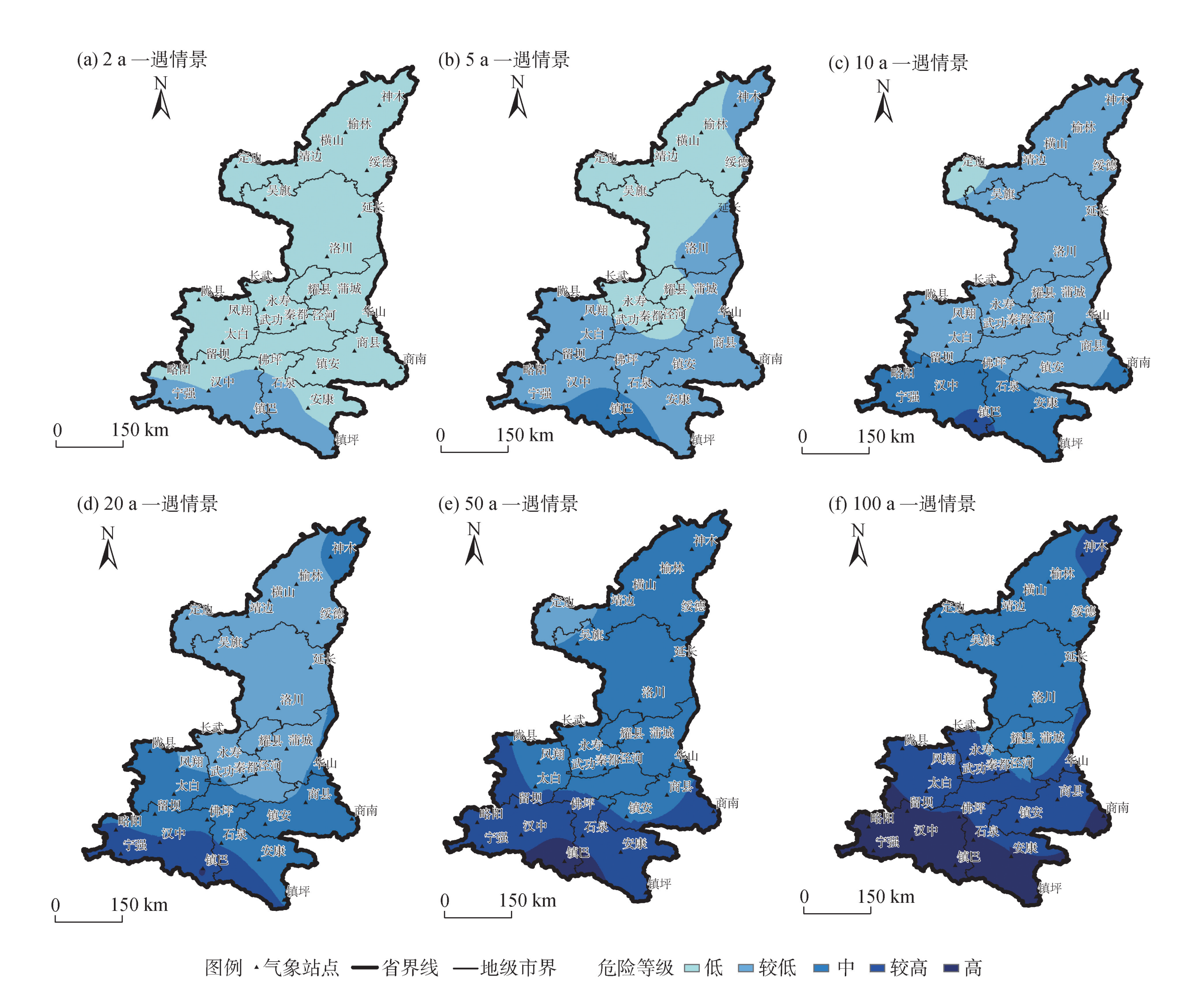


图5　不同重现期下陕西省汛期极端降水综合危险性空间分布

Fig. 5　Spatial distributions of comprehensive risk of extreme precipitation in flood season in Shaanxi Province under different return periods

小,较低危险区占绝大多数,中等危险区面积也在加大。陕北除定边站外全为较低危险区;关中地区全为低危险区;陕南地区的镇巴站为较高危险区,镇安、商县为较低危险区,其余为中等危险区。

20 a一遇情景下,陕西省极端降水综合危险性为较低、中和较高3种。陕北地区的神木站为中等危险区,其余为较低危险区;关中地区的长武站、耀县站、蒲城站、永寿站、秦都站、泾河站为较低危险区,其余为中等危险区;陕南地区较高危险区面积增大,略阳、汉中、镇巴、宁强站为较高危险区,其余为中等危险区。

50 a一遇情景下,陕西省汛期极端降水综合危险性为较低、中等、较高和高危险4种。陕北的定边站处于较低危险区,其余为中等危险区;关中地区的陇县站为较高危险区,其余为中等危险区;陕南地区的镇巴站为高危险区,镇安站、商县站为中等危险区,其余为较高危险区。

100 a一遇情景下,高危险区地区增多,危险性为中、较高和高3种。陕北地区的神木站处于较高危险区,其余为中等危险区;关中地区的耀县站和蒲城站为中等危险区,其余处于较高危险区;陕南地区的商县站、镇安站处于较高危险区,其余为高危险区。

进一步对综合危险性进行评估,通过面积的变化趋势反映危险区变化情况,由图7计算出不同重现期下各极端降水综合危险性所占面积比(表5)。2 a一遇情景下,低危险区面积占比为84.9%,高危险区面积占比为0,随着重现期增加,危险等级也不断增大;5 a一遇情景下,出现中危险区,面积占比为6.4%;10 a一遇情景下,出现较高危险区,面积比为1.7%;20 a一遇情景下,陕西省内低危险区消失,出现高危险区,其面积占比为0.1%;50 a一遇情景下,高危险区面积增大,面积占比为3.7%;100 a一遇情景下,较低危险区消失,高危险区面积占比增加到22.0%。

表5 不同重现期下各极端降水综合危险性等级面积占比

Tab. 5 Area proportion of comprehensive risk of each extreme precipitation under different return periods /%

危险等级	重现期					
	2 a	5 a	10 a	20 a	50 a	100 a
低	84.9	39.3	2.6	0.0	0.0	0.0
较低	15.1	54.3	72.5	52.1	4.3	0.0
中	0.0	6.4	23.2	35.7	63.4	45.3
较高	0.0	0.0	1.7	12.1	28.6	32.7
高	0.0	0.0	0.0	0.1	3.7	22.0

3 讨论

陕西省极端降水空间差异显著[21],因此关于危险性的研究十分关键[22-23],多数都是通过构建指标体系对极端降水危险性进行评估,鲜少有在概率分布模型的基础上进行危险性分析。通过研究发现陕西省未来极端降水事件发生可能性大大增加,这与全球极端降水事件变化一致[24]。目前多数研究[25-26]中常用P-Ⅲ型、GEV、GPD分布模型计算研究区不同重现期下的极端降水量,越来越多学者[15-16]使用Wakeby分布模型拟合极端降水序列计算极端降水量。针对陕西省极端降水指标目前还没有具体的概率分布模型研究,本文选取6种极值分布拟合极端降水指标,得出Wakeby分布是陕西省汛期极端降水量、降水频数、降水强度的最优概率分布模型,并用Wakeby分布模型计算不同重现期下的极端降水量,得到未来陕西省发生极端降水事件的可能性增大;通过极端降水指标叠加分析可以看出不同情景下陕西省各地区危险性变化明显,陕南地区综合危险性>关中地区>陕北地区。

本研究存在一些不足:(1)由于数据可获取性,仅选用了32个气象站点数据,后期可以考虑增加气象站点数以提高结果精度;(2)仅从危险性研究了陕西省极端降水变化,还可以结合脆弱性、暴露性等综合分析极端降水带来的风险,进一步研究暴雨灾害风险管理,为政府防灾减灾提供科学建议。

4 结论

(1)拟合陕西省汛期极端降水量、极端降水频次和极端降水强度3个极端降水指标序列,得到其最优分布模型是Wakeby分布函数。

(2)通过对不同重现期下陕西省各地区极端降水量的计算,同一重现期下陕西省降水极值呈南多北少分布,陕北地区发生极端降水事件的可能性较小,关中地区的大部分站点降水较多,发生极端事件可能性较大,陕南地区整体发生极端降水事件可能性较大。陕西省大多数地区汛期降水会朝着小

概率、高危险性的极端降水事件发展。

（3）不同情景下陕西省汛期极端降水综合危险性整体呈南高北低分布。具体分析如下：陕北地区综合危险性较低，仅在100 a情景下神木站发展较高危险区，其余站最高综合危险区等级仅为中等；关中地区在2 a、5 a、10 a、20 a情景下危险区等级均不超过中等，50 a情景下陇县发展为较高危险区，100 a情景下除耀县和蒲城外全为较高危险区；陕南地区高危险区占比最大，其中镇巴站发生危险事件可能性最大，因其在20 a情景下已发展为高危险区，除镇安和商县外，其余地区在100 a情景下全为高危险区。

参考文献（References）

[1] 唐明秀, 孙劭, 朱秀芳, 等. 基于CMIP6的中国未来暴雨危险性变化评估[J]. 地球科学进展, 2022, 37(5): 519-534. [Tang Mingxiu, Sun Shao, Zhu Xiufang, et al. CMIP6 assessment of changes in hazard of future rainstorms in China[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(5): 519-534.]

[2] 应急管理部发布2021年全国自然灾害基本情况[J]. 中国减灾, 2022(3): 7. [Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China released the basic information of national natural disasters in 2021[J]. Disater Reduction in China, 2022(3): 7.]

[3] Liang L, Zhao L N, Gong Y F, et al. Probability distribution of summer daily precipitation in the Huaihe Basin of China based on Gamma distribution[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012, 26(1): 72-84.

[4] 桂文林, 徐芳燕. 广义Pareto分布尾部厚度的分析与应用[J]. 统计与决策, 2009(6): 153-155. [Gui Wenlin, Xu Fangyan. Analysis and application of tail thickness of generalized Pareto distribution [J]. Statistic & Decision, 2009(6): 153-155.]

[5] 葛咏, 李强子, 凌峰, 等. "一带一路"关键节点区域极端气候风险评价及应对策略[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(2): 170-178. [Ge Yong, Li Qiangzi, Ling Feng, et al. Risk assessment and response strategies for extreme climate events in key nodes of the Belt and Road[J]. Bulletin of Chinese Academy of Science, 2021, 36(2): 170-178.]

[6] 唐瑜聪. 深圳市极端气候时空特征及其灾害风险评估[D]. 北京: 中国地质大学, 2017. [Tang Yucong. Spatial-temporal characteristics and disater risk assessment of climate extremes in Shenzhen[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.]

[7] 周静静, 张晓敏, 赵法锁, 等. 陕南秦巴山区地质灾害危险性评价研究[J]. 地质力学学报, 2019, 25(4): 544-553. [Zhou Jingjing, Zhang Xiaomin, Zhao Fasuo, et al. Research on risk assessment of geological hazards in Qinling-Daba Mountain area, south Shannxi Province[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(4): 544-553.]

[8] 王鹏, 邓红卫. 基于GIS和Logistic回归模型的洪涝灾害区划研究[J]. 地球科学进展, 2020, 35(10): 1064-1072. [Wang Peng, Deng Hongwei. Study on flood hazard risk zoning based on GIS and Logistic regression model[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(10): 1064-1072.]

[9] 迟潇潇. 1960—2009年中国极端降水时空特征及风险分析[D]. 上海: 上海师范大学, 2016. [Chi Xiaoxiao. Temporal and spatial characteristics and risk analysis of extreme precipitation in China from 1960 to 2009[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2016.]

[10] 华商网. 陕西省第一次全国自然灾害综合风险普查工作稳步推进[EB/OL]. [2021-09-09]. https://www.emerinfo.cn/2021-09/09/c_1211362962.htm. [Huashangwang. The first national natural disaster comprehensive risk survey in Shaanxi Province has been steadily promoted[EB/OL]. [2021-09-09]. https://www.emerinfo.cn/2021-09/09/c_1211362962.htm.]

[11] 光明网. 汉江出现2021年第1号洪水[EB/OL]. [2021-08-23]. https://m.gmw.cn/baijia/2021-08/23/1302505566.html. [Guangmingwang. The first flood in 2021 occurs in Hanjiang River[EB/OL]. [2021-08-23]. https://m.gmw.cn/baijia/2021-08/23/1302505566.html.]

[12] 宋晓猛, 张建云, 孔凡哲. 基于极值理论的北京市极端降水概率分布研究[J]. 中国科学:技术科学, 2018, 48(6): 639-650. [Song Xiaomeng, Zhang Jianyun, Kong Fanzhe. Probability distribution of extreme precipitation in Beijing based on extreme value theory [J]. Scientis Sinica (Technologica), 2018, 48(6): 639-650.]

[13] 佘敦先, 夏军, 张永勇, 等. 近50年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1200-1210. [She Dunxian, Xia Jun, Zhang Yongyong, et al. The trend analysis and statistical distribution of extreme rainfall events in the Huaihe River in the past 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(9): 1200-1210.]

[14] 张明, 李国胜. 关中地区极端降水时空变化及概率特征研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(11): 59-64. [Zhang Ming, Li Guosheng. Trend analysis and statistical distribution of extreme rainfall in Guanzhong area[J]. Yellow River, 2021, 43(11): 59-64.]

[15] 陆苗, 高超, 姚梦婷, 等. 淮河流域极端降水概率分布模型及其应用[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 197-203, 208. [Lu Miao, Gao Chao, Yao Mengting, et al. Probability distribution model and its application on extreme precipitation in Huaihe River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(2): 197-203, 208.]

[16] 陆苗, 高超, 苏布达, 等. 淮河流域极端降水空间分布及概率特征[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(5): 160-168. [Lu Miao, Gao Chao, Su Buda, et al. Spatial distribution and probabilistic characteristics of extreme precipitation in the Huaihe River Basin[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(5): 160-168.]

[17] 李占玲, 王武, 李占杰. 基于GPD分布的黑河流域极端降水频率特征分析[J]. 地理研究, 2014, 33(11): 2169-2179. [Li Zhanling, Wang Wu, Li Zhanjie. Frequency analysis of extreme precipi-

tation in Heihe River Basin based on generalized Pareto distribution[J]. Geographical Research, 2014, 33(11): 2169–2179.]
[18] Houghton J C. Birth of a parent: The Wakeby distribution for modeling floor flows[J]. Water Resource Research, 1978, 14(6): 1105–1109.
[19] Min S K, Zhang X, Zwiers F W, et al. Hunman contribution to more-intense precipitation extremes[J]. Nature, 2011, 470(7334): 378–381.
[20] GB/T 28592–2012. 中华人民共和国国家标准: 降水量等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012. [GB/T 28592–2012. National standard of the People's Republic of China: Precipitation grade[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.]
[21] 丁莹莹, 邱德勋, 吴常雪, 等. 关中平原极端降水时空变化及其与大气环流的关系[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 104–112. [Ding Yingying, Qiu Dexun, Wu Changxue, et al. Spatial-temporal variations in extreme precipitation and their relationship with atmospheric circulation in the Guanzhong Plain[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 104–112.]
[22] 李乐乐, 钞锦龙, 赵德一, 等. 1957—2019年山西省暴雨时空分布特征与暴雨灾害风险评估[J]. 干旱区地理, 2023, 46(5): 689–699. [Li Lele, Chao Jinlong, Zhao Deyi, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of rainstorm and risk assessment of rainstorm disasters in Shanxi Province from 1957 to 2019[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(5): 689–699.]
[23] 荣广智, 张继权, 李天涛, 等. 极端降水诱发地质灾害链风险评估研究——以贵州省水城县为例[J]. 灾害学, 2022, 37(4): 201–210. [Rong Guangzhi, Zhang Jiquan, Li Tiantao, et al. Study on risk assessment of extreme precipitation-induced geological disaster chain: A case study of Shuicheng County, Guizhou Province[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(4): 201–210 .]
[24] 周波涛, 钱进. IPCC AR6报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713–718. [Zhou Botao, Qian Jin. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713–718.]
[25] 王月华, 李占玲, 赵韦. 河西走廊内陆河流域极端降水特征分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 333–339. [Wang Yuehua, Li Zhanling, Zhao Wei. Characteristics of precipitation extremes for inland river basins in Hexi Corridor[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2016, 52(3): 333–339.]
[26] 张利平, 杜鸿, 夏军, 等. 气候变化下极端水文事件的研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(11): 1370–1379. [Zhang Liping, Du Hong, Xia Jun, et al. Progress in the study of extreme hydrologic events under climate change[J]. Progress in Geography, 2011, 30(11): 1370–1379.]

Probability distribution and comprehensive risk assessment of extreme precipitation in flood season in Shaanxi Province

SHI Weiliang, CHE Luyang, LI Tao

(School of Statistics, Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: Rainstorms and the resulted floods represent the second most important type of natural disaster in the Shaanxi Province of China. To clearly describe the risk arising from extreme precipitation events, extreme precipitation amount, frequency, and intensity series were constructed using 1969—2020 flood season (May-October) daily precipitation data for Shaanxi Province. Six extreme-value probability distribution models were selected to fit the constructed series to obtain the optimal probability distribution model for flood season extreme precipitation and to evaluate the future trend of extreme precipitation events in Shaanxi Province. The comprehensive risk of extreme precipitation was evaluated based on spatial risk distributions of different scenarios in Shaanxi Province. The results showed that: (1) Through error analysis and comparison, the Wakeby probability distribution was found to be the optimal model for fitting the sequence of extreme precipitation indicators during the flood season in Shaanxi Province, accounting for the largest proportion of extreme values in the three constructed series. (2) Extreme precipitation values with different return periods were calculated and compared with existing maximum precipitation values. An increased probability of low-probability and high-risk extreme precipitation events was found for most areas of Shaanxi Province. (3) The comprehensive risk of extreme precipitation during the flood season was found to be generally high in the south and low in the north of Shaanxi Province. Risk areas differed between scenarios of 2-, 5-, 10-, 20-, 50-, and 100-year return periods. With increasing return periods, the low-risk area gradually reduced and the high-risk area gradually increased. In the 100-year return period scenario, the high-risk area increased from 0 to 22.0%. The study provides a reference for the investigation of extreme precipitation probability distributions in Shaanxi Province and provides a theoretical basis for extreme precipitation risk management and assessment during flood seasons.

Key words: extreme precipitation; probability distribution; hazard analysis; risk assessment; Shaanxi Province